

TA15 钛合金不等厚 L 型材热轧有限元模拟

武小娟¹, 杨 川¹, 张志强², 孟凡玲¹, 柏春光², 李 萍³

(1. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110158)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(3. 沈阳中钛装备制造有限公司, 辽宁 沈阳 110206)

摘要: 利用有限元分析软件 Deform-3D 建立 TA15 钛合金不等厚 L 型材的轧制模型, 研究各道次轧件温度场、应变场、金属流动速度的变化规律。模拟结果表明, 轧制过程中产生的大量变形热会导致轧件温度升高, 且 K1 ~ K3 道次薄壁侧温度明显高于厚壁侧。在 K6 和 K7 道次轧制时, 轧件温度过低, 需回炉补温。轧件的应变随轧制道次的增加而增加, 薄壁侧应变大于厚壁侧。轧件各部位温度及变形量的变化会影响轧件金属流动速度, 在 K1 道次轧制时, 厚壁侧与薄壁侧的流动速度差较大, 导致轧件产生弯曲变形。采用楔形坯料可有效避免轧件出现变形弯曲。

关键词: TA15 钛合金; 不等厚型材; 热轧; 有限元模拟

中图分类号: TG337.6; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)01-001-05

Finite Element Simulation of Hot Rolling Process for TA15 Titanium Alloy L Profile with Unequal Thickness

Wu Xiaojuan¹, Yang Chuan¹, Zhang Zhiqiang², Meng Fanling¹, Bai Chunguang², Li Ping³

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110158, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(3. Zhongtai Group Co., Ltd., Shenyang 110206, China)

Abstract: The hot rolling process of TA15 titanium alloy L profile with unequal thickness was simulated using finite element analysis software Deform-3D. The temperature field, strain field and metal flow velocity of TA15 titanium alloy after each pass were investigated. The results show that the temperature of rolled pieces increases by the large amount of deformation heat generated during rolling process, and the temperature of the thin-wall side is higher than that of the thick-wall side during K1 ~ K3 pass. During the K6 and K7 pass, the temperature of rolled piece is too low, and it needs to be reheated. Furthermore, the equivalent strain of the rolled piece increases with the increased passes. And the equivalent strain of the thin-wall side is larger than that of the thick-wall side. The metal flow velocity of the rolled piece is affected by the temperature and deformation extent. At K1 pass, the flow velocity difference between the thick-wall side and the thin-wall side is bigger, which could result in bending of the rolled piece. And this problem can be effectively solved with a wedge blank.

Key words: TA15 titanium alloy; unequal thickness profile; hot rolling; finite element simulation

TA15 钛合金是一种近 α 型钛合金, 具有比强度高、抗蠕变性能好、热稳定性高和耐腐蚀性能优异等优点, 被广泛应用于航空航天、舰船、能源等领

域^[1-3]。采用 TA15 钛合金不等厚 L 型材加工飞机隔框与桁条, 不仅减重效果显著, 而且能够提高飞机的装载能力^[4]。但钛合金型材成形难度较大, 尺寸和性能往往难以满足要求。目前, 我国高质量钛合金型材主要以进口为主, 部分规格型号的型材还受到发达国家的出口限制, 因而亟需开展相关生产工

收稿日期: 2021-09-22

基金项目: 辽宁省科技重大专项项目(TDZX-16-022)

通信作者: 张志强(1981—), 男, 副研究员。

艺和加工技术的研究。采用传统实验方法研究钛合金型材轧制,存在耗时、耗力、耗财的缺点^[5],而采用理论分析方法进行轧制研究,因轧制边界问题较为复杂,导致求解难度较大。有限元模拟是基于结构力学分析发展起来的一种现代计算方法,可用于各种材料加工模拟,具有成本低、效率高的优点。近年来,有限元模拟广泛应用于钛合金变形轧制领域,利用有限元模拟能够深入了解轧制过程中材料的温度场、应力应变场等变化规律,在优化轧制工艺方面发挥了重要作用^[6]。

采用有限元分析软件 Deform-3D 对 TA15 钛合金不等厚 L 型材的轧制进行模拟,研究轧件温度场、应变场、金属流动速度的分布规律,为 TA15 钛合金型材轧制工艺设计及优化提供理论依据。

1 有限元模型建立

1.1 轧制模型建立

TA15 钛合金不等厚 L 型材为直角等边 L 形,其边长 27 mm,内角半径 3 mm,薄壁侧厚度 1.6 mm,厚壁侧厚度 2.1 mm,截面尺寸如图 1 所示,轧制有限元模型如图 2 所示。轧制模型包括上下轧辊、入口导卫、出口导卫、推块和坯料。其中,出口导卫和

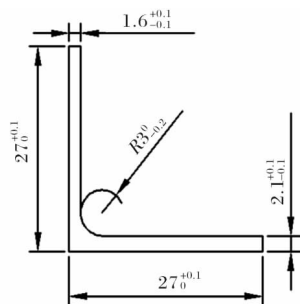


图 1 TA15 钛合金 L 型材截面尺寸示意图

Fig. 1 Section size diagram of TA15 titanium alloy L profile

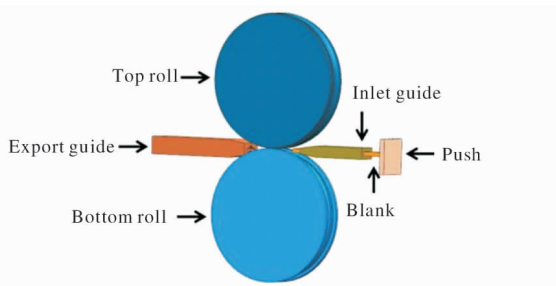


图 2 TA15 钛合金 L 型材轧制有限元模型

Fig. 2 Finite element model of TA15 titanium alloy L profile rolling

入口导卫是为了约束轧件的直线度,推块是用来推动坯料向辊缝运动,以顺利进入稳态轧制阶段。轧辊、推块和导卫均设为刚体,坯料设为刚塑性体。坯料规格为 100 mm × 37 mm × 11.5 mm。

1.2 工艺参数与边界条件的设定

坯料初始轧制温度为 950 °C,轧辊温度为 50 °C,轧辊转动速度为 9.3 rad/s,推块移动速度为 0.3 m/s,坯料热辐射系数为 0.5,坯料与环境的对流换热系数为 0.02 W/(m²·K)。模具之间的摩擦设定为库伦摩擦,摩擦系数为 0.5,界面间的热传导率为 11 W/(m·K)。

1.3 TA15 钛合金本构模型和热物理性能

参照 Sellars 等提出的双曲正弦本构模型,建立 TA15 钛合金热塑性变形本构方程,如式(1)和式(2)所示^[7]。

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left[\dot{\epsilon} \cdot \exp(Q/RT)/A \right]^{\frac{1}{n}} + \left\{ \left[\dot{\epsilon} \cdot \exp(Q/RT)/A \right]^{\frac{2}{n}} + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2)$$

式中: A 、 α 、 n 均为材料常数; Q 为变形激活能, J/mol; R 为气体常数, 8.31 J/(mol·g·K); σ 为流动应力, MPa; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; T 为绝对温度, K。具体计算过程见文献[7]。

在 Deform-3D 软件的材料数据库中输入 TA15 钛合金的一些基本热物性参数。TA15 钛合金的泊松比为 0.39,不同温度(T)下的热膨胀系数(α_v)、热导率(λ)、比热容(c)见表 1^[8-10]。

表 1 TA15 钛合金的热物性参数

Table 1 Thermal physical parameters of TA15 titanium alloy			
T/K	α_v/K^{-1}	$\lambda/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	$c/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
473	9.00×10^{-6}	10.2	2.612
673	9.70×10^{-6}	12.2	2.982
873	1.04×10^{-5}	15.1	3.360
1073	1.10×10^{-5}	18.0	3.916
1273	1.20×10^{-5}	25.5	4.984

1.4 TA15 钛合金不等厚 L 型材轧制模拟

将 TA15 钛合金不等厚 L 型材轧制过程分为 K1 ~ K7 共 7 个道次,各道次间轧件转移时间为 2 ~ 5 s。利用有限元分析软件 Deform-3D 进行轧制模拟,分析各道次轧制后轧件截面的温度场和应变场分布,以及轧件横截面的金属流动速度。

2 模拟结果与分析

2.1 温度场分析

轧件温度是轧制过程中重要的工艺参数,合适的轧件温度可保证轧制过程的稳定性。在整个轧制过程中,材料的温度会发生很大的变化,主要影响因素有坯料的初始温度、与空气及轧辊的热交换、与轧辊表面的摩擦热以及坯料的变形热^[11,12]。轧件与轧辊和环境之间存在较大的温差,故轧件会与周围介质进行热交换导致温度降低;而轧制过程中的塑性变形产生的变形热,以及轧件与轧辊之间产生的摩擦热,会致使轧件温度升高。因此,整个变形过程始终存在热量的产生与散失,导致轧件温度不断变化,而温度会影响轧件的组织、性能及成形质量^[13-15]。

图 3 为通过有限元模拟的各道次轧制后 TA15 钛合金轧件截面的温度场分布图。TA15 钛合金坯料加热到 950 °C,转移到轧机的时间约为 10 s,此时坯料中心最高温度约为 917 °C,表面最低温度约为 835 °C (图 3a)。K1 道次轧制后,最高温度位于轧件薄壁侧

靠近中心处,约为 936 °C,最低温度位于厚壁侧边缘,约为 839 °C (图 3b)。K1 道次轧制后轧件温度明显高于轧制前坯料的温度,其主要原因是轧件在轧制时,塑性变形及摩擦产生的热量高于损耗的热量,导致轧件的温度升高。由于薄壁侧变形量大于厚壁侧,产生较多塑性变形热,导致 K1 ~ K3 道次轧件薄壁侧温度明显高于厚壁侧温度。K4 道次轧件两侧温度分布较对称,而 K5 ~ K7 道次轧件厚壁侧温度高于薄壁侧,其主要原因是轧件的热量散失主要发生在轧制完成后轧件与环境之间的热交换,薄壁侧热量散失快于厚壁侧,导致薄壁侧降温更快。并且随着轧件的延长,轧制时间逐渐变长,同时由于轧件变长以及孔型逐渐缩小,人工更换道次耗费的时间相应增加,轧件与空气之间的热量交换增加,轧件会出现明显的温降现象,最终导致整个轧制过程中轧件整体平均温度呈下降趋势。此外,模拟结果表明,K6 和 K7 道次轧制前的轧件温度过低,已经影响轧件的稳定轧制。因此,在 K6、K7 道次轧制之前应当进行回炉补温。

综上所述,K1 ~ K4 道次,由于轧件变形量较大,产生的热量多,升温明显;K5 ~ K7 道次轧件变薄,热量损耗大,降温明显。在实际轧制生产时,应当尽量缩短轧件的转移时间,使轧件保持适宜的温度,保证轧制稳定进行。

2.2 应变场分析

TA15 钛合金轧件经不同道次轧制后,横截面的应变场分布如图 4 所示。由于轧件为不等厚 L 型材,薄壁侧(截面图右侧)压下量始终高于厚壁侧(截面图左侧),导致 K1 ~ K7 道次轧件薄壁侧应变高于厚壁侧。轧件经 K1 道次轧制后,薄壁侧上表面和顶角下表面存在较大的应变(图 4a),意味着这两处变形量较大。较大的变形量会使轧件产生大量变形热,故 K1 道次轧件薄壁侧上表面和顶角下表面温度较高(图 3b)。此外,轧件上下表面的应变高于轧件心部,其原因主要是上下表面与轧辊直接接触,在上下轧辊的挤压作用下发生变形从而产生应变。而轧件内部与轧辊的距离较远,因此变形量较小。虽然轧件上下表面变形量较大,但由于热量损耗较快,其温度低于心部(图 3b)。K2 道次轧制完成后,由于轧件变形量增加,其应变明显升高。轧件两侧末端,即受轧辊挤压而产生宽展部位,由于其未与轧辊直接接触,因此该部位应变量较小。K3 ~ K5 道次

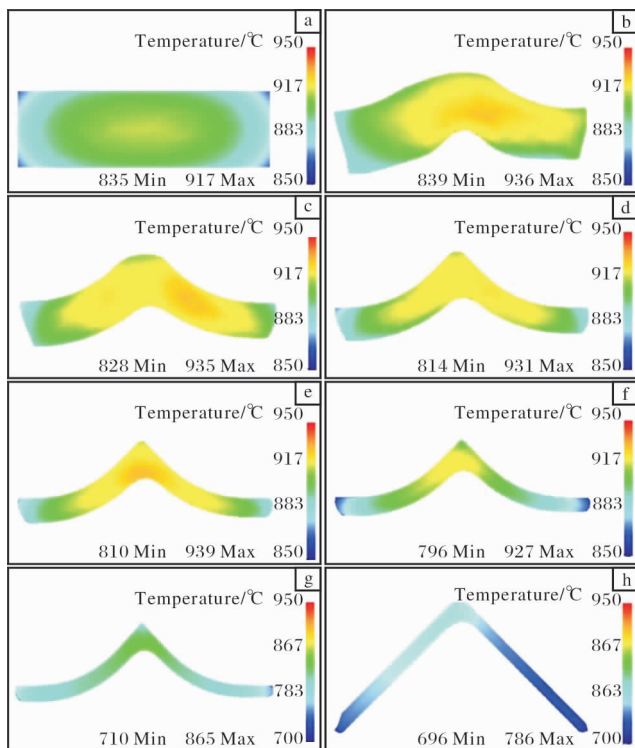


图 3 各道次轧制后轧件截面的温度场分布图

Fig. 3 Temperature field distributions of rolled piece cross section after each pass: (a) blank; (b) K1 pass; (c) K2 pass; (d) K3 pass; (e) K4 pass; (f) K5 pass; (g) K6 pass; (h) K7 pass

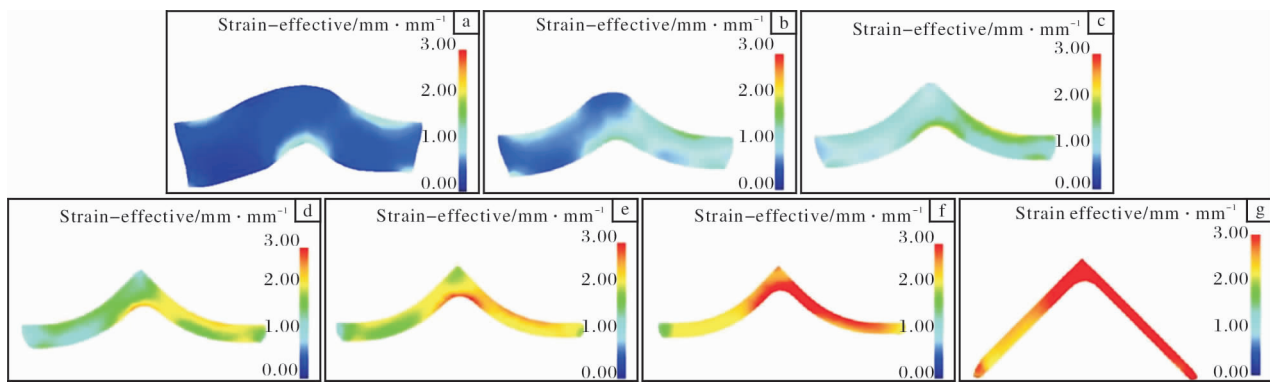


图4 各道次轧制后轧件横截面的应变场分布

Fig. 4 Strain field distributions of rolled piece cross section after each pass; (a) K1 pass; (b) K2 pass; (c) K3 pass; (d) K4 pass; (e) K5 pass; (f) K6 pass; (g) K7 pass

轧件应变分布特征与 K2 道次基本一致。与 K2 道次轧件相比, K3 ~ K5 道次轧件孔型的顶角处夹角变小, 导致较大的应变出现在顶角两侧。随着轧制的进行, K6 和 K7 道次轧件的应变持续增加。由于 K6 和 K7 道次轧件的壁厚较薄, 轧件上下表面应变与心部无明显差别。此外, 由于 K7 道次是对型材两壁进行矫直的过程, 因此在轧件顶角位置及其两侧弯曲处存在较大应变。

2.3 金属流动速度分析

在轧制过程中, 轧件的横截面面积会因孔型的变化而不断变化, 导致轧件各部位的金属流动速度不同。图 5 为轧件横截面上下表面的金属流动速度曲线。根据金属流动速度变化, 将其分为 3 个区域: I 区(厚壁侧)、II 区(中部)、III 区(薄壁侧)。K1 道

次轧件 III 区上下表面金属流动速度均较大, 而 I 区流动速度相对较小, 主要是由于 III 区位于轧件薄壁侧, 其下压量和温度均高于 I 区(厚壁侧)所致。I 区和 III 区之间的金属流动速度差异导致轧件弯曲。结合图 3b 及图 4a 可知, I 区和 III 区上表面挤压变形较大, 导致其金属流速大于下表面。而在 II 区, 由于下表面温度高且变形量较大, 因此该位置金属流动速度高于上表面。K3 道次轧制过程中, 轧件上表面顶角(II 区)金属流动速度明显低于两侧(I 区和 III 区), 这是由于 K3 道次轧制过程中顶角基本成形, 流向顶角位置的金属材料减少所导致。K7 道次轧件上下表面金属流动速度变化趋势(图 5c)与 K3 道次一致, 轧件 I 区和 III 区上表面的金属流动速度大, II 区下表面的金属流动速度大。

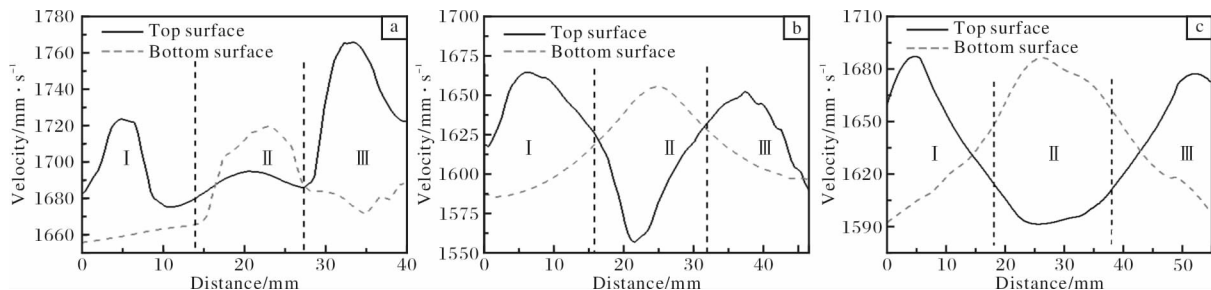


图5 轧件横截面金属流动速度曲线

Fig. 5 Curves of metal flow velocity of rolled piece cross section; (a) K1 pass; (b) K3 pass; (c) K7 pass

在 K1 道次轧制过程中, 厚壁侧与薄壁侧之间的流动速度差导致轧件产生弯曲变形。轧件两侧产生速度差的主要原因是薄壁侧的压下量大于厚壁侧。因此, 解决型材两侧压下量不一致的问题, 即可有效消除轧件弯曲现象。根据这个思路, 尝试采用楔形坯料减小薄壁侧与厚壁侧的金属流动速度差, 消

除轧件弯曲现象。图 6 为所采用的 4 组楔形坯料截面尺寸示意图。不同尺寸坯料经 K1 道次轧制时, 轧件横截面不同位置金属流动速度分布如图 7 所示。K1 道次轧制后轧件形状如图 8 所示。由模拟结果可知, 坯料尺寸为 38 mm × 11.5 mm × 9.0 mm 时两侧速度差最小(图 7), 弯曲现象基本消除(图 8)。故

在实际生产中,可尝试选用截面尺寸为 $38\text{ mm} \times 11.5\text{ mm} \times 9.0\text{ mm}$ 的楔形坯料消除不等厚 L 型材弯曲现象。

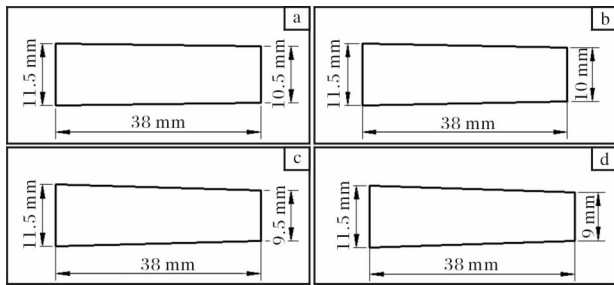


图6 楔形坯料截面尺寸示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of wedge blanks sectional dimension

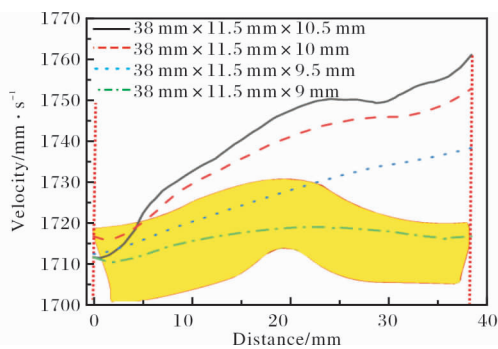


图7 不同尺寸坯料经 K1 道次轧制后轧件截面的金属流动速度

Fig. 7 Metal flow velocity of rolled pieces cross section after K1 pass rolling

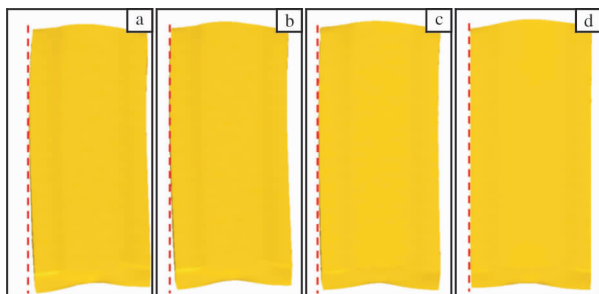


图8 不同尺寸坯料经 K1 道次轧制后的轧件形状

Fig. 8 Shape of rolled pieces with different size after K1 pass rolling: (a) $38\text{ mm} \times 11.5\text{ mm} \times 10.5\text{ mm}$; (b) $38\text{ mm} \times 11.5\text{ mm} \times 10.0\text{ mm}$; (c) $38\text{ mm} \times 11.5\text{ mm} \times 9.5\text{ mm}$; (d) $38\text{ mm} \times 11.5\text{ mm} \times 9.0\text{ mm}$

3 结论

(1) TA15 钛合金 L 型材在轧制过程中,产生的大量变形热及摩擦热会导致轧件温度升高;随着轧件逐渐变薄,在转移过程中,轧件与空气及轧辊的

热传递致使轧件温度下降。在 K6 和 K7 道次轧制时,轧件温度过低,需进行回炉补温。

(2) 轧件的应变随轧制道次的增加不断递增。L 型材薄壁侧应变大于厚壁侧。

(3) 轧件不同部位的温度及变形量不同,导致轧件内部金属流动速度存在差异。厚壁侧和薄壁侧之间的金属流动速度差异导致轧件产生弯曲变形。采用楔形坯料可解决该问题。

参考文献 References

- [1] Ma B L, Wu X D, Li X J, et al. Investigation on the hot formability of TA15 titanium alloy sheet[J]. Materials & Design, 2016, 94: 9-16.
- [2] 闵新华, 纪仁峰. 锻造工艺对 TA15 钛合金扁坯组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2016, 33(6): 36-39.
- [3] 杨健. 钛合金在飞机上的应用[J]. 航空制造技术, 2006(11): 41-43.
- [4] 张明杰, 齐立春, 黄利军, 等. TA15 钛合金挤压薄壁型材拉伸性能及差异性研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(5): 7-11.
- [5] 黄冲. TC4 钛合金热变形性质研究和型材轧制工艺仿真模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [6] 李沐泽. TC2 钛合金高温热变形行为及型材轧制有限元模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [7] 骆俊廷, 陈艺敏, 尹宗美, 等. TA15 钛合金热变形应力应变曲线及本构模型[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(2): 399-405.
- [8] 沈昌武. TA15、TC11 钛合金热变形材料本构模型研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [9] 尹宗美. TA15 钛合金热加工本构模型及微观组织预测研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [10] 卢政. TA15 钛合金大型薄腹板锻件成形技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [11] 胡明, 董利民, 张志强, 等. Ti-6Al-4V 合金多道次热轧过程有限元模拟与实验[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 956-961.
- [12] 黄衣娜. 钛合金薄壁型材轧制有限元模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [13] Ghoo B Y, Keum Y T, Kim Y S. Evaluation of the mechanical properties of weld metal in tailored steel sheet by CO₂ laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1/3): 692-698.
- [14] 檀雯, 杨军, 王永强, 等. Ti3111 钛合金厚板轧制过程数值模拟[J]. 世界有色金属, 2016(16): 29-31.
- [15] 徐如涛, 李斌, 王克鲁. 钛合金环件径向轧制过程温度场模拟与分析[J]. 热加工工艺, 2012, 41(19): 92-93.